



مدل‌سازی فشار مویینگی میکروسایالات در میکروساختارها با نرم افزار Surface Evolver

حمید صفاری^۱، امیر میرزاقیطاقی^{۲*} و علیرضا رحیمی^۳

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۳ کارشناس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۹/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

چکیده

شکل، هندسه و زاویه تماس میکروساختارها نقش مهمی در تعیین عملکرد مویینگیشان دارند. در پژوهش حاضر، فشار مویینگی سیال در میکروساختارهای کروی و میکروستون‌های با مقطع دایروی و مربعی به صورت عددی بررسی می‌شود. به منظور تخمین فشار مویینگی به عنوان انرژی سطح مشترک در واحد حجم، شکل سطح سیال در میکروساختارها با استفاده از الگوریتم کمینه‌سازی انرژی سطحی با کدنویسی در نرم افزار تعیین می‌شود. به منظور صحت‌سنجی، فشار مویینگی میکروکره‌ها با سایر نتایج موجود مقایسه می‌شود. در ادامه، فشار مویینگی برحسب مشخصات هندسی بدون بعد و زاویه تماس بین مایع و جامد در میکروستون‌ها ارائه می‌شود. بر اساس نتایج، میکروکره‌ها روی سطح به عنوان موثرترین ساختار هندسی برای مویینگی می‌باشند. همچنین، فشار مویینگی حاصل از میکروستون‌های مربعی در نسبت جامد و فاصله مشخص، بیش از میکروستون‌های دایروی است. نتایج تعیین فشار مویینگی میکروسایالات در میکروساختارها می‌تواند در حوزه‌های مختلف علوم کشاورزی، نساجی و پلیمر، نفت و انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: فشار مویینگی؛ میکروساختار؛ مدل‌سازی عددی؛ سطح آزاد؛ نرم افزار SE.

Modeling Micro-fluidic Capillary Pressure in Micro-structures by Surface Evolver Software

H. Saffari¹, A. M. Gheithaghy^{2,*}, and A. Rahimi³

¹ Assoc. Prof., Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

² PhD Student, Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

³ BSc Student, Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Abstract

The topology, geometry, and contact angle of micro-structures play crucial roles in determining their capillarity performance. In this work, the capillary pressure of a liquid in micro-structure topologies, viz., sphere, circular, and square pillars is investigated numerically. In order to estimate the capillary pressure as the change in interfacial energy per unit volume, the shape of liquid interface in the micro-structures is determined using a surface-energy minimization algorithm by coding in a software. Capillary pressures of micro-spheres in different contact angles are verified in comparison with the other results. Capillary pressures were presented versus non-dimensional geometrical parameters characterizing the micro-structures and the contact angle between the liquid and solid. Based on these performance parameters, packed spheres on a surface are identified to be the most efficient micro-structure geometry for capillarity. Also square pillars are shown to have a higher capillary pressure compared with hexagonal arrays of circular pillars with the same solid fraction and pitch. The results for the micro-fluidic capillary pressure in micro-structures can be used in different sciences such as agriculture, textile and polymer, petroleum, and heat transfer.

Keywords: Capillary Pressure; Micro-structure; Numerical Simulation; Free Surface; Surface Evolver Software.

۱- مقدمه

مبحث پخش‌شوندگی سیال در میکروساختارهای مویین به علت هم‌پوشانی با برخی پدیده‌های طبیعی و کاربردهای گسترده در میکروسیالات، اهمیت زیادی یافته است. کاربردهای مربوط به انجام تحقیقات در زمینه شکل میکروسیالات به حوزه‌های کلی، پلیمر و نساجی، کشاورزی و زه‌کشی منابع نفت و گاز، محیط‌های متخلخل برای بهبود انتقال حرارت و ترمودینامیک تقسیم می‌شود. در حوزه پلیمر، رفتار سیال در میان میکروورشته‌های عمودی و افقی مهم است. در کاربرد زه‌کشی، رفتار سیالات آب یا نفت در میان ذرات شن و ماسه اهمیت دارد که به صورت میکروکره مدل می‌شوند. در علم ترمودینامیک، ساختارهای متخلخل متنوع با قابلیت ساخت به منظور بهبود انتقال حرارت، مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱].

در میان ساختارهای مویین، آرایه‌های میکروستونی به دلیل کاربرد در سیستم‌های کنترل حرارت [۲]، تجهیزات زیست پزشکی [۳]، جداسازی الکتریکی ترکیبات [۴]، قالب-ریزی رزین [۵] و ... مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. یکی از شاخصه‌های دسته‌بندی، سرعت حرکت سیال در بین این ساختارهاست که با توجه به فشار مویینگی و نفوذپذیری بدست می‌آید. میکروساختارها، باعث افزایش نیروی مویینگی می‌شوند و کوچکتر کردن منافذ موجود در ساختارها، منجر به افزایش مویینگی سطوح خواهد شد. نیروی مویین حاصل از کشش سطحی، فشاری بر سیال اعمال می‌نماید که موجب تغییر شکل سطح آزاد سیال و حرکت سیال در جهات آزادی (جایی که انرژی تماسی مایع-جامد کمتر از انرژی تماسی جامد-گاز است) می‌شود.

تاریخچه بررسی فشار مویینگی و تاثیر آن بر نحوه شکل-گیری سطح و حرکت سیال به سال ۱۹۲۱ برمی‌گردد. جایی که ادوارد واشبرن^۱ [۶] برای اولین بار معادله‌ای برای بالانس ارتفاع سیال بالا آمده در لوله مویین و فشار مویینگی ارائه کردند. در سال ۱۹۶۹، پریسن^۲ [۷] میزان بالا آمدن سیال از استوانه‌های مویین چیده شده در کنار هم را به صورت

تحلیلی و تجربی مطالعه و تاثیر عوامل مختلف همچون قطر، فاصله، نوع چینش و زاویه تماس استوانه‌ها را بررسی کرد. امروزه با افزایش توانایی ساخت میکروسطوح پیچیده با خواص متفاوت و افزایش روزافزون کاربردهای اینگونه سطوح، محاسبه اختلاف فشار ناشی از مویینگی به سادگی توسط روش‌های تحلیلی قابل محاسبه نیست. همچنین به علت پیچیدگی آزمایشات در ابعاد میکرو و هزینه بالا، مدل‌سازی-های عددی در اولویت قرار گرفته است. در بین کارهای عددی نیز، توجه بیشتر به سمت روش‌هایی است که با کمترین هزینه (زمان و حافظه مصرفی و ...) دقیق‌ترین جواب‌ها را ارائه کنند. یکی از روش‌های مدل‌سازی شکل سیال در سطوح میکروساختار و تعیین فشار مویینگی، استفاده از نرم‌افزار SE^۳ است. این نرم‌افزار که در ابتدا برای استفاده در علوم ریاضی و تولید سطوح کمینه در سال ۱۹۹۱ توسط پروفیسور بریک^۴ نوشته شده بود، در سال‌های اخیر توجه دانشمندان سایر علوم کاربردی به ویژه مکانیک و مواد را به خود جلب کرده است [۸].

در سال ۲۰۱۰ بدارکار و واینبرگ^۵ نحوه رفتار سیال در تماس با دو رشته باریک که قابلیت تعمیم به چند رشته را نیز داراست، به صورت عددی توسط نرم‌افزار SE مدل‌سازی نموده و تاثیر پارامترهای مختلف را بر روی شکل سیال بررسی نمودند [۹]. هیلدن و ترومبل^۶ از این نرم‌افزار برای مدل‌سازی سطوح مویین اشغال‌کننده فضای خالی بین چند کره که به شکل مثلثی در کنار هم چیده شده‌اند استفاده کردند. آن‌ها در غیاب جاذبه شکل سطوح مویین و رابطه بین فشار مویین و اندازه سطوح را با زاویه تماس بدست آوردند [۱۰]. پس از آن، اسلوبوژانین^۷ و همکاران ساختار مربعی کره-ها را مدل کردند و در مقایسه نتیجه گرفتند چیدمان مثلثی کره‌ها مویینگی بیشتری ایجاد می‌نماید [۱۱]. رنجان^۸ و همکاران ساختارهای کروی و استوانه‌ای مورد استفاده در انتقال حرارت تبخیری را مدل و مویینگی و نفوذپذیری سیال را با تغییر پارامترهای دخیل بررسی نمودند [۱۲]. هونگ و

^۳ Surface Evolver^۴ Brakke^۵ Bedarkar & Vaynberg^۶ Hilden & Trumble^۷ Slobozhanin^۸ Ranjan^۱ Washburn^۲ Princen

جالبی مانند وابستگی ناپیوسته به شرایط مرزی در نقاط منفرد، مورد توجه قرار گرفته است.

در فیزیک، معادله یانگ-لاپلاس به منظور تعیین ارتباط فشار مویینگی به انحناى سطح کمینه مشترک بین دو سیال به کار می‌رود.

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

در نبود جاذبه و در حالت استاتیک، سطوح مایعات طوری شکل می‌گیرند که به انحناى میانگین ثابت در همه نقاط برسند؛ بنابراین سطح کمینه در ریاضیات، معادل با سطح سیال در نبود نیروی گرانش است که تعیین‌کننده میزان نیروی مویینگی حاصل از سیال در تماس با سطح جامد است [۱]. گروه‌های بی‌بعدی مانند، عدد وبر، عدد مویینگی و عدد باند که به ترتیب نسبت نیروی اینرسی، نیروی لزجت و نیروی گرانش را به کشش سطحی نشان می‌دهند، در تعیین رفتار سیال در مقیاس‌های میکرو مهم می‌گردند. طول مشخصه سیستم‌های میکرو در حدود چندصد میکرومتر است که خیلی کوچکتر از طول مویینگی ۲/۷ میلی‌متر برای آب می‌باشد. در مقیاس‌های میکرو، عدد باند کوچک است و می‌توان از نیروی گرانش در مدل‌سازی صرفنظر کرد. این مدل‌سازی برای مقیاس‌های بزرگتر در شرایط بی‌وزنی فضا نیز صادق است. البته نرم‌افزار SE، قابلیت در نظر گرفتن گرانش را نیز دارد.

۳- روش مدل‌سازی

همانگونه که در بخش قبل ذکر گردید، فشار مویینگی به کشش سطحی و شعاع متوسط انحناى سطح بستگی دارد. در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار در دسترس SE، سطح سیال را در میکروساختارهای جامد تعیین کرده، از روی آن مقدار فشار مویینگی به دست خواهد آمد. این نرم‌افزار منبع باز با قابلیت دستورپذیری هنگام اجرا^۳ برای مطالعه سطوحی است که با تنش و انرژی سطحی نسبت داده شده به سطوح جامد و مایع آن، شکل نهایی خود را تشکیل می‌دهند. کاربر سطح اولیه را برای نرم‌افزار تعریف می‌کند و سطح با المان مثلثی مش زده می‌شود. این نرم‌افزار با الگوریتم گرادیان کاهش که یک الگوریتم مرتبه اول برای حصول مینیمم‌های محلی است،

بیون^۱ مدلی نیمه تحلیلی با استفاده از این نرم‌افزار برای تعیین فشار مویینگی در میکروستون‌های مربعی و دایروی با چیدمان ایزوتروپیک ارائه نمودند [۱۳]. بیون و کیم^۲ عملکرد عملکرد مویینگی در چند چیدمان غیرهمگن میکروپیست‌های استوانه‌ای را مدل‌سازی و آزمایش کردند [۱۴].

مروری بر مطالعات گذشته نشان می‌دهد، معرفی نرم‌افزار SE، نقش عمده‌ای در تحقیقات مربوط به میکروسیالات ایفا نموده، عملاً تاریخچه مطالعات در زمینه شکل مایعات در تماس با جامدات را شاید بتوان به دوران قبل از استفاده از این نرم‌افزار و بعد از آن تقسیم کرد؛ به گونه‌ای که قبل از معرفی این نرم‌افزار، تحقیقات انجام شده اکثراً به روش آزمایشگاهی و تحلیلی بود، ولی بعد از آن تحقیقات به سمت روش‌های عددی سوق پیدا کرد. نکته دیگری که قابل توجه است، درهم‌تنیدگی تحقیقات انجام شده در زمینه‌های ذکر شده است، به گونه‌ای که با وجود تفاوت‌های بنیادین در کاربردها، دانشمندان از نتایج بدست‌آمده توسط محققان سایر علوم برای تحقیقات خود بهره‌گرفته‌اند، مخصوصاً در کاربردهای ترمودینامیکی که به‌روزتر از سایر موارد است.

این مقاله با استفاده از نرم‌افزار SE، به بررسی شکل سطح سیال و نیروی مویینگی حاصل در ساختارهای میکروکره و میکروستون‌های با سطح مقطع دایروی و مربعی با چیدمان کلی (ایزو و غیرایزوتروپیک) می‌پردازد. مقایسه این ساختارها می‌تواند به انتخاب بهتر میکروساختارها برای دستیابی به فشار مویینگی بیشتر میکروسیالات در تجهیزات پیشرفته کمک نماید.

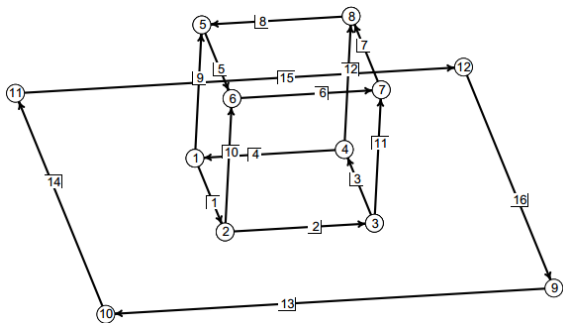
۲- فیزیک مسئله

طبق اصول ترمودینامیکی، سیستم‌ها به سمت کمترین انرژی ممکن خود حرکت می‌کنند و این اصل در مورد تماس مایعات نیز برقرار است یعنی مایعات در برخورد با سطوح جامد به دنبال رسیدن به کمترین سطح انرژی هستند. سطح کمینه سطحی است که با در نظر گرفتن قیدهایی که بر آن اعمال شده است، به کمترین مساحت ممکن دست یابد. این سطوح در ریاضیات به دلیل طبیعت غیرخطی و خواص

¹ Hong & Byon

² Byon & Kim

³ Interactive



شکل ۱ - تعریف مکعب برای مدل‌سازی قطره روی سطح

برابر با تنش بین سطح تماس مایع و بخار ضرب در کسینوس زاویه تماس است). بعد از تعریف این تنش‌ها برای سطوح مختلف توسط دستورات نرم‌افزاری، نرم‌افزار شکل نهایی قرارگیری قطره را بر اساس کمترین میزان انرژی ایجاد می‌کند که سیستم می‌تواند با توجه به قیود داده شده و انرژی‌های نسبت داده شده داشته باشد، ولی این روش دارای مشکلاتی است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. روش دیگر برای اعمال زاویه تماس مورد نظر به قطره، حذف وجه شماره ۱ مکعب و نسبت دادن انرژی به اضلاع اطراف وجه شماره ۱ (اضلاع ۱ تا ۴)، به گونه‌ای که انتگرال خط این مسیر برابر با انرژی نسبت داده شده به صورت مستقیم به وجه در روش اول گردد. اگر چگالی انرژی برای وجه شماره ۱، T در نظر گرفته شود، بنابراین برای نسبت دادن انرژی به

اضلاع به میدان برداری مانند \vec{w} چنان احتیاج است که

$$\iint_{\text{deleted face}} T\vec{k} \cdot d\vec{s} = \int_{\partial(\text{deleted face})} \vec{w} \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

بنابراین بر اساس قضیه گرین تمام چیزی که احتیاج است، $\text{curl } \vec{w} = T\vec{k}$ خواهد بود که برای \vec{w} بینهایت تابع وجود دارد، ولی در این جا از تابع $\vec{w} = -Ty\vec{i}$ استفاده شده است. البته باید به این نکته اشاره کرد که همیشه تعیین چنین تابعی آسان نخواهد بود و در برخی مواقع چاره‌ای به جز استفاده از روش اول وجود ندارد.

طبق قضیه گرین انتگرال میدان برداری گذرنده از سطح بسته برابر با انتگرال کرل آن میدان برداری روی لبه‌های سطح است.

$$\int_{\partial S} \vec{w} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y} \right) dx dy \quad (3)$$

همچنین می‌شود، زاویه تماس را با اضافه کردن وجه شماره ۱ مکعب و نسبت دادن تنش سطحی برابر با چگالی

شروع به انجام فرایند نهایی‌سازی شکل سطح می‌کند تا به کمترین میزان انرژی برسد. انرژی می‌تواند ترکیبی از تنش سطحی، گرانش، انحنای میانگین، انتگرال سطوح تعریف شده توسط کاربر و یا انرژی اختصاص یافته به گره‌ها باشد. این نرم‌افزار، توانایی پشتیبانی انواع مختلف توپولوژی‌ها، قیدهای حجمی، زوایای تماس، انحنای میانگین تعریف شده توسط کاربر، جاذبه‌ها و قیدهای که توسط انتگرال سطح به نرم‌افزار داده می‌شود را دارا می‌باشد.

قدرت نرم‌افزار SE، علاوه بر سرعت عمل بالا، در دامنه وسیع مسائلی نهفته است که قابلیت حل آن‌ها را دارد و همچنان نیز روند طرح مسائل جدید با این نرم‌افزار و ارائه پاسخ‌های جدیدتر ادامه دارد. از موارد مدل شده توسط این نرم افزار، می‌توان به تعیین شکل سیال در مخازن سوخت راکت‌های فضایی [۱۵]، شبیه‌سازی رشد دانه‌ها [۱۶]، تغییر شکل فوم‌ها [۱۷]، مطالعه پلیمرها [۱۸]، شبیه‌سازی قطره روی سطوح ساختاریافته [۱۹] اشاره کرد.

۴- نتایج

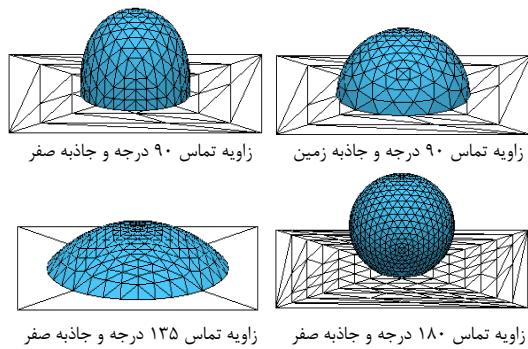
در این بخش، نتایج مدل‌سازی سیال در میکروساختارها ارائه می‌شود. ابتدا به منظور آشنایی و صحت سنجی اولیه، شکل قطره روی سطح صاف با زوایای تماس مختلف و شرایط با و بدون گرانش مدل‌سازی می‌شود. سپس، مدل‌سازی قطره بین نیم‌کره‌ها و سیال بین میکروکره‌ها انجام و میزان فشار مویبندی با نتایج فعالیت‌های سایرین مقایسه می‌شود. در بخش نهایی، میکروستون‌های با مقطع مربعی و دایروی با چیدمان کلی، مدل و فشار مویبندی در این ساختارها با تغییر فاصله، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- مدل‌سازی قطره روی سطح صاف

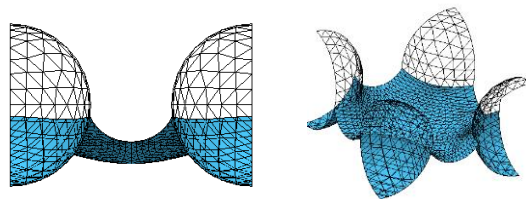
مدل‌سازی قطره با ایجاد مکعبی که یک وجه آن (وجه شامل اضلاع ۱ تا ۴ که در اینجا وجه شماره ۱ نامیده می‌شود) روی سطح صاف (که در اینجا با سطح $Z=0$ به آن اشاره شده است) قرار گرفته، انجام می‌شود (مطابق شکل ۱).

راحت‌ترین راه برای تعریف زاویه تماس بین سطح و قطره مورد نظر، مقید نمودن وجه شماره ۱ مکعب به ماندن روی سطح $Z=0$ و نسبت دادن تنش سطحی متفاوت با تنش سطحی دیگر سطوح است (که این عدد بر اساس رابطه یانگ

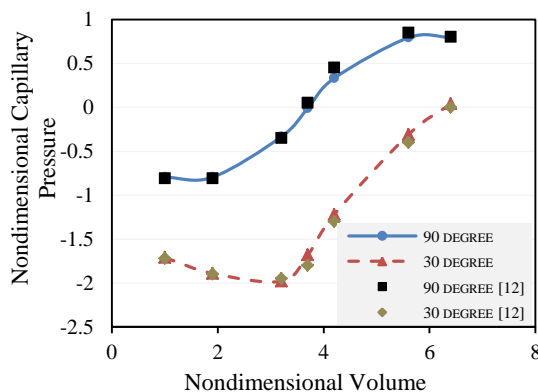
نماینده کل سطح را داراست و با استفاده از قید تقارن روی تمام اضلاع گسترش می‌یابد. سطح نمونه میکروستون مربعی و پارامترهای تعریف شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود. با تغییر پارامترهای ساختاری می‌توان به چینش‌های متفاوت از ساختار مکعبی دست یافت. شکل گسترش یافته ساختار فوق، در شکل ۶ نشان داده شده است و در شکل ۷، نمای کامل ساختار مکعبی نشان داده شده است.



شکل ۲- شبیه سازی تشکیل قطره روی سطح در چند زاویه تماس و جاذبه



شکل ۳ - قرارگیری قطره بین چهار کره با چینش مربعی و فاصله مرکز تا مرکز 3R و زاویه تماس 30 درجه



شکل ۴- فشار موینگی بر حسب حجم سیال و زاویه تماس برای چینش مربعی کره‌ها

انرژی تماسی بین قطره و سطح مورد نظر ایجاد نمود، اما این روش هنگامی ایجاد مشکل می‌کند که لبه‌های اطراف وجه شماره ۱ بخواهند به سمت داخل وجه حرکت کنند (برای زوایای تماس بزرگتر از ۹۰ درجه). بعد از چند مرحله شبیه‌سازی، نقاط داخلی وجه شماره ۱ دیگر نیرویی حس نمی‌کنند و جابه جا نمی‌شوند؛ بنابراین جمع شدن برای وجه شماره ۱ زمانی دشوار می‌شود که نقاط اطراف لبه‌ی آن به نقاط میانی آن می‌رسند و باعث ایجاد چروک در وجه شماره ۱ قطره می‌شود.

در شکل ۲، نتایج حاصل از این مدل‌سازی برای زوایای تماس و جاذبه‌های مختلف مشاهده می‌شود. در حالت وجود جاذبه، سطح تماس قطره روی سطح بیشتر می‌شود. در زاویه تماس ۱۸۰ درجه (سطح آب گریز) و بدن جاذبه، قطره کاملاً کروی است.

۲-۴- مدل‌سازی قطره بین میکروکره‌ها

در شکل ۳ به عنوان نمونه سیال بین چهار کره با شعاع R چینش مربعی و فاصله مرکز تا مرکز 3R و زاویه تماس ۳۰ درجه در نرم‌افزار SE نشان داده شده است. نحوه قرارگیری سیال بر اساس مینیمم‌سازی انرژی در هر مرحله بهبود یافته تا به شکل نهایی خود برسد. در حالت کلی، شکل نهایی سطح تابعی از تنش جامد-مایع، حجم سیال و زاویه تماس است.

برای بررسی صحت برنامه کامپیوتری نوشته شده در نرم افزار SE، فشار موینگی در حالت چینش کره‌ها به صورت مربعی در زوایای تماس ۳۰ و ۹۰ درجه با مرجع [۱۲] در شکل ۴ مقایسه شده است که نشان‌دهنده تطابق مطلوب است. مقادیر منفی فشار موینگی، نشان‌دهنده مکش است که در ساختارهای فتیله‌ای مطلوب است. داده‌های نمایش داده شده در شکل همانند خروجی‌ها و ورودی‌های نرم‌افزار، بی‌بعد است. حجم و فشار موینگی بی‌بعد به صورت ذیل تعریف می‌گردند:

$$\Delta P = \Delta p \cdot r / \gamma_{LV} \quad , \quad V = v / r^3 \quad (4)$$

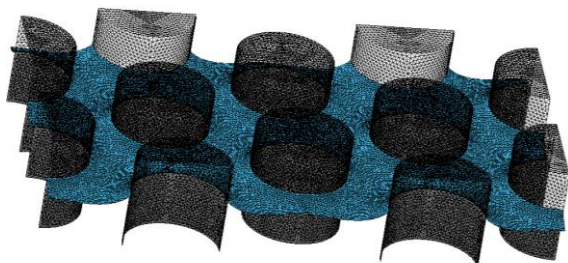
۳-۴- مدل‌سازی سیال بین میکروستون‌ها

برای مدل‌سازی میکروستون‌های با سطح مقطع دایره و مربع، بخشی از سطح مدل شده است که قابلیت انتخاب به عنوان

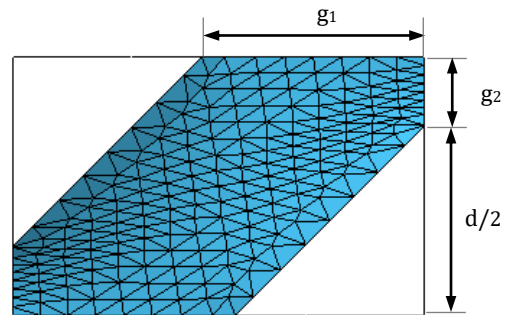
مانند، اندازه ستون‌ها و فاصله بین آن‌ها، زاویه تماس بین سیال و سطح جامد تغییر داده شده است و برای دو حالت ستون‌های مربعی و دایروی در چینش مثلثی، نتایج در شکل ۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است، برای مقایسه این دو ساختار، پارامتری به نام تخلخل که عبارت از نسبت حجم خالی به حجم کل فضا، تعریف و برای هر دو ساختار یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین چینش ستون‌ها در این حالت، چینش مثلثی یا هگزاگونال است که البته نتیجه نمایش داده شده در نمودار برای سایر چینش‌ها نیز صادق است. قطر مربع‌ها ۵۰ میکرومتر و فاصله عرضی آن‌ها نیز ۵۰ میکرومتر است و اندازه‌های مربوط به استوانه‌ها با ثابت در نظر گرفتن تخلخل بدست آمده است.

چنانچه در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، تغییرات فشار مویبگی به صورت کسینوسی نسبت به زاویه تماس تغییر می‌نماید. همچنین هرچه زاویه تماس به ۹۰ درجه نزدیک‌تر شود، قدرمطلق مویبگی کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در زاویه تماس ۹۰ درجه فشار مویبگی به صفر می‌رسد که این موضوع از آنجایی که در این زاویه تماس برای این اشکال، سطح مایع کاملاً افقی خواهد بود، از قبل قابل پیش‌بینی بود. به علاوه، قدر مطلق مویبگی ستون‌های مربعی نسبت به ستون‌های دایروی بیشتر است.

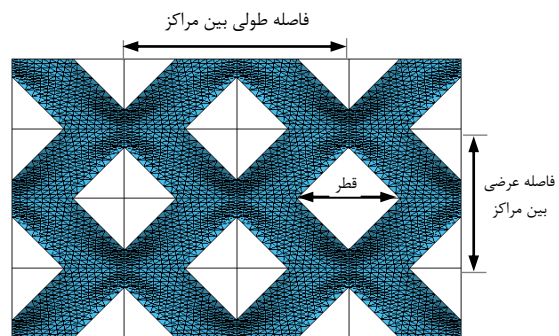
با توجه به علامت فشار مویبگی، سطح آب گریز با زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه تمایل به راندن سیال دارد و سطح آب دوست با زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه، تمایل به مکش سیال دارد. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در زاویه تماس کمتر از ۹۰، سطح سیال به صورت محدب است و سیال به سمت دیواره کشیده می‌شود، اما در زوایای بیشتر از ۹۰ درجه، سطح مقعر است و سطح سیال را به داخل می‌فشارد.



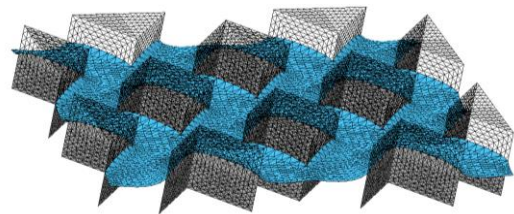
شکل ۸- نمای سه بعدی سیال بین میکروستون‌های با سطح مقطع دایروی با زاویه تماس ۴۵ درجه



شکل ۵- نمای بالای سطح مدل شده توسط نرم‌افزار



شکل ۶- نمای گسترش یافته میکرو استوانه‌های مربعی در حالت چینش مثلثی



شکل ۷- نمای سه بعدی سیال بین میکروستون‌های با سطح مقطع مربعی با زاویه تماس ۴۵ درجه

همین فرآیند مدل‌سازی برای ستون‌های دایروی نیز تکرار و در این حالت، d قطر دایره است. در شکل ۸، نمای سه بعدی این ساختار نشان داده شده است.

۴-۳-۱- تاثیر زاویه تماس

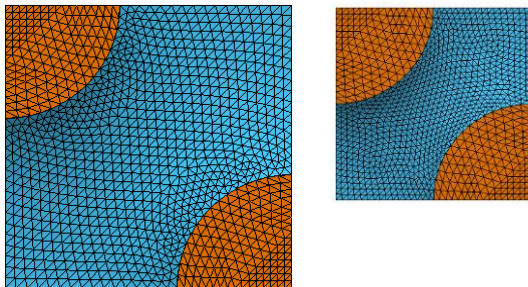
در ادامه فشار مویبگی در حالت‌های مختلف بررسی می‌شود. ابتدا تاثیر تغییر زاویه تماس بین سیال و سطح جامد روی مویبگی بررسی می‌شود. با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترهایی

بماند؛ یعنی نمودار فوق تنها برای چینش مربعی قابل قبول است و اطلاعات دیگری راجع به مقایسه بین چینش‌ها در اختیار ما قرار نمی‌دهد. در ادامه، تاثیر تغییر اندازه گپ‌ها به نوعی بررسی خواهد شد که تخلخل ثابت بماند و چینش‌ها تغییر کنند.

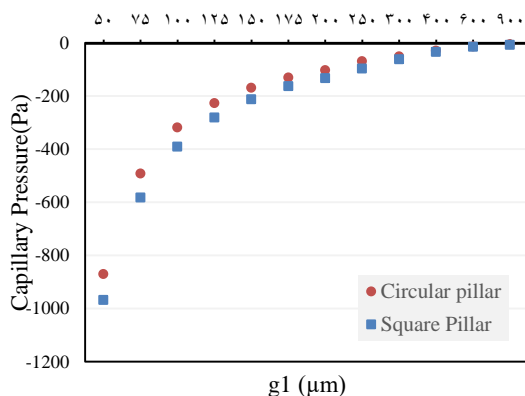
در شکل ۱۲، تغییر فشار مویبگی نسبت به تغییر فاصله بین ستون‌ها برای دو ساختار ستون‌های مربعی و دایروی نشان داده شده است.

۳-۳-۴- تاثیر چینش ساختارها

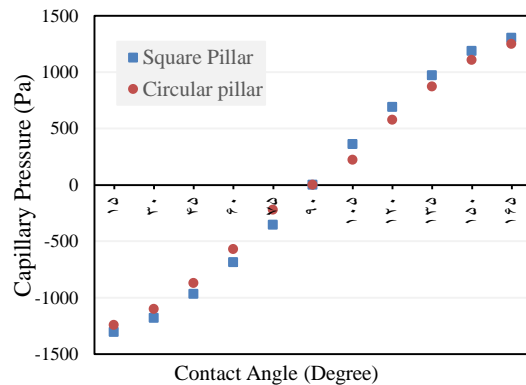
در جدول ۱، تخلخل برابر با ۰.۲۵ در نظر گرفته شده و گپ‌ها به گونه‌ای تغییر کرده‌اند که تخلخل ثابت بماند و چینش‌های مختلف بوجود آیند؛ در حالتی که گپ‌ها با هم مساوی هستند، چینش مربعی بوجود می‌آید و هرچه اختلاف اندازه گپ‌ها بیشتر می‌شود، ساختار نامنظم‌تر شده، مشاهده می‌شود، فشار مویبگی افزایش می‌یابد.



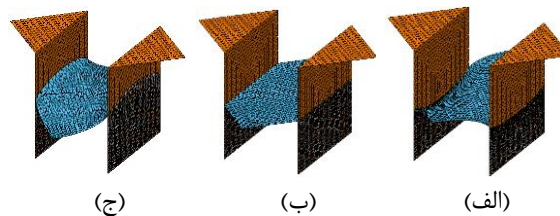
شکل ۱۱- تغییر فاصله بین استوانه‌ها با ثابت بودن قطر آن‌ها



شکل ۱۲- نمودار فشار مویبگی بر حسب فاصله بین ستون‌ها در آرایش مربعی



شکل ۹- نمودار اختلاف فشار بر حسب زاویه تماس برای حالات ستون‌های با سطح مقطع دایروی و مربعی



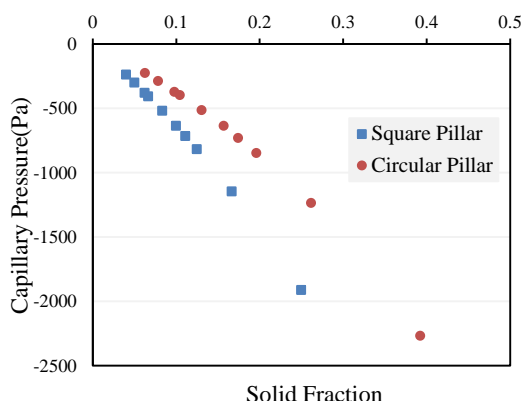
شکل ۱۰- تاثیر زاویه تماس در شکل سطح: زاویه تماس (الف) ۱۳۵ درجه، (ب) ۹۰ درجه و (ج) ۴۵ درجه.

۳-۳-۴- تاثیر اندازه ساختارها

تحلیل این بخش با اندکی پیچیدگی همراه است؛ چون متغیرهای این بخش به طور کامل مستقل از هم نیستند و با تغییر هر پارامتر، بالاجبار برخی پارامترهای دیگر نیز تغییر می‌کند. مثلا با تغییر اندازه گپ‌ها (فضاهای خالی) که به منظور تغییر در چینش ساختارها انجام می‌گیرد، حجم مایع نیز تغییر می‌کند و با تغییر اندازه اشکال نیز، همین اتفاق برای گپ‌ها و حجم می‌افتد. ابتدا تغییر فاصله بین ستون‌ها در چینش مربعی (برابری فواصل عرضی و طولی بین مراکز) بررسی می‌شود. به گونه‌ای که قطر ستون‌ها ثابت است و فقط اندازه فاصله بین آنها تغییر می‌کند (شکل ۱۱).

نمودار فوق بیان‌کننده این نکته است که با افزایش فاصله بین ستون‌ها، مویبگی کاهش می‌یابد و در نهایت به سمت صفر میل می‌کند و هرچه ستون‌ها به هم نزدیکتر باشند، مویبگی نیز افزایش پیدا می‌کند.

نتایج ذکر شده در بالا برای حالتی است که فاصله‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کنند که چینش ستون‌ها دست نخورده باقی



شکل ۱۳- نمودار موینگی بر حسب نسبت جامد

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار Surface Evolver رفتار سیال در بین سطوح با میکروساختارهای استوانه‌ای و مکعبی و کرومی مدل شده، نتایج موردنظر شامل، شکل سطح سیال و فشار موینگی استخراج شده است. نتایج نشان دادند که فشار موینگی با کسینوس زاویه تماس وابسته بوده، همچنین با کاهش فاصله میکروساختارها، افزایش می‌یابد. همچنین میکروستون‌های با سطح مقطع مربعی، فشار موینگی بیشتری در نسبت جامد یکسان نسبت به میکروستون‌های با سطح مقطع دایروی دارند و با افزایش نسبت جامد، اختلاف بیشتر می‌شود.

۶- فهرست علائم

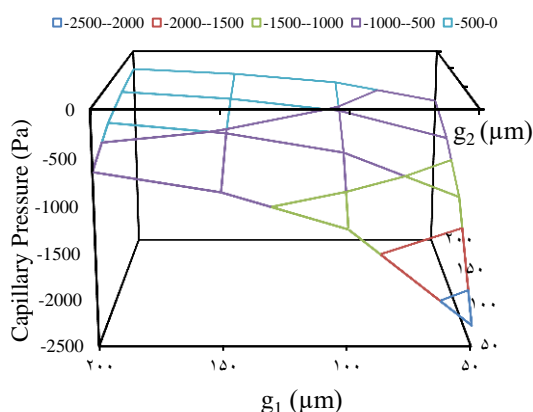
نشانه	علامت
اختلاف فشار در راستای عمود بر سطح مشترک	Δp
تابع برداری	\vec{w}
چگالی انرژی تماس در سطح	T
حجم سیال داخل سلول واحد	v
حجم بی بعد سیال	V
زاویه تماس	θ
شعاع کره	r
شعاع انحنای اصلی سطح	R_1, R_2
فشار موینگی بی بعد	ΔP
قطر مربع	d
کشش سطحی	γ_{LV}

جدول ۱- فشار موینگی برای ساختار با ستون‌های مربعی در چینش‌های مختلف و تخلخل ثابت

$g_1(\mu m)$	$g_2(\mu m)$	Capillary pressure(Pa)
100	100	-358.9
150	60	-368.2
166	51	-371.5
200	33	-393.4
250	14.2	-413.1

شکل ۱۳، فشار موینگی بر اساس تغییر گپ‌ها در میکروستون‌های دایروی را بدون در نظر گرفتن ثبات تخلخل، نشان می‌دهد. با کوچکتر شدن گپ‌ها موینگی افزایش می‌یابد. همچنین نمودار دارای تقارن نسبت به صفحه $g_1=g_2$ یا چینش مربعی است؛ یعنی با تغییر گپ‌ها در جهات متفاوت، تغییری در نتایج حاصل نمی‌شود.

می‌توان فشار موینگی را برحسب یک منهای تخلخل که نسبت جامد نامیده می‌شود، به صورت شکل ۱۳ رسم نمود. نمودار ۱۴، بیان‌گر عملکرد بهتر موینگی ساختار با ستون‌های با سطح مقطع مربع نسبت به دایره در نسبت جامدهای ثابت است. با افزایش نسبت جامد، اختلاف موینگی ساختارها افزایش می‌یابد. علت موینگی بیشتر میکروساختار مربعی، انحنای بیشتر سطح مایع در لبه‌های زاویه دار مربع و همچنین فاصله کمتر مراکز در نسبت جامد ثابت و قطر مشابه است. تاثیر این عوامل با نزدیک شدن ساختارها و افزایش نسبت جامد، افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳- نمودار فشار موینگی بر حسب اندازه گپ‌ها بدون ثابت در نظر گرفتن تخلخل

- morphology transition. *J Colloid Interface Sci* 341: 326-32.
- [10] Hilden J, Trumble K (2003) Numerical analysis of capillarity in packed spheres: Planar hexagonal-packed spheres. *J Colloid Interf Sci* 267: 463-474.
- [11] Slobozhanin L, Alexander J, Collicott S, Gonzalez S (2006) Capillary pressure of a liquid in a layer of close-packed uniform spheres. *Phys Fluids* 18: 82-104.
- [12] Ranjan R, Murthy J, Garimella S (2009) Analysis of the wicking and thin-film evaporation characteristics of microstructures. *J Heat Trans-T ASME* 131: 1-11.
- [13] Hong D, Byon C (2014) Analytic Correlation for the Capillary Pressure of MicroSquare-Pillar Arrays. *Int J Precis Eng Man* 15(12): 2677-2680.
- [14] Byon C, Kim S (2014) Study on the capillary performance of micro-post wicks with non-homogeneous configurations. *Int J Heat Mass Tran* 68: 415-421.
- [15] Collicott SH (2014) Computing the effects of practical tolerances on propellant management device performance. *AIAA J* 52(7): 1578-1580.
- [16] Wakai F (2007) Three-dimensional simulation of coarsening and grain growth in sintering. *Mater Sci Forum* 539: 2359-64.
- [17] Cox SJ (2005) A viscous froth model for dry foams in the Surface Evolver. *Colloid Surface A* 263(1): 81-89.
- [18] Kirchner R, Schleunitzand A, Schiff H (2014) Energy-based thermal reflow simulation for 3D polymer shape prediction using Surface Evolver. *J Micromech Microeng* 24(5): 55010-16.
- [19] Fischer G, Bigerelle M, Kubiak K J, Mathia T G, Khatir Z, Anselme K (2014) Wetting of anisotropic sinusoidal surfaces-experimental and numerical study of directional spreading. *Surf Topogr Metrol Prop* 2(4): 44003-13.
- نصف فاصله بین مراکز میکروستون‌ها در راستای عرض g1
- نصف فاصله بین مراکز میکروستون‌ها در راستای طول g2
- ۷- مراجع**
- [1] Berthier J, Brakke K (2012) *The Physics of microdroplets*. 2nd edn. John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Nam Y, Sharratt S, Byon C, Kim S J, Ju Y S (2010) Fabrication and characterization of the capillary performance of superhydrophilic cu micropost arrays. *J Microelectromech S* 19(3): 581-588.
- [3] Nagrath S, Sequist L, Maheswaran S, Bell D, Irimia D (2007) Isolation of rare circulating tumour cells in cancer patients by microchip technology. *Nature* 450(7173): 1235-1239.
- [4] Cui H, Lim K (2009) Pillar array microtraps with negative dielectrophoresis. *Langmuir* 25(6): 3336-3339.
- [5] Patel N, Rohatgi N, Lee L (1995) Micro scale flow behavior and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat. *Polym Eng Sci* 35(10): 837-851.
- [6] Washburn W (1921) Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 115-116.
- [7] Princen H (1969) Capillary phenomena in assemblies of parallel cylinders: II. Capillary rise in systems with more than two cylinders. *J Colloid Interf Sci* 30: 359-371.
- [8] Brakke KA (1992) *The Surface evolver*. *Exp Math* 1(2): 141-165.
- [9] Wu X, Bedarkar A, Vaynberg K (2010) Droplets wetting on filament rails: surface energy and